

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-207479
(43)Date of publication of application : 03.08.1999

(51)Int.Cl. B23K 26/00
H01S 3/00

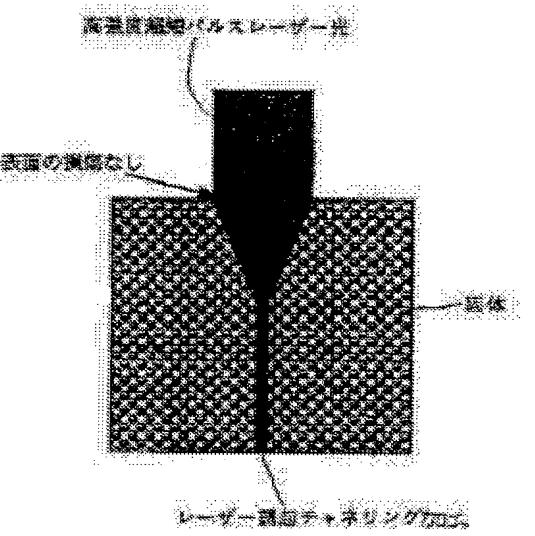
(21)Application number : 10-023880 (71)Applicant : RIKAGAKU KENKYUSHO
(22)Date of filing : 21.01.1998 (72)Inventor : KUMAGAI HIROSHI
MIDORIKAWA KATSUMI

(54) HIGH INTENSIVE SUPER SHORT PULSE LASER BEAM MACHINING METHOD AND ITS MACHINE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To machine or reform the only internal part of a solid body without damaging the surface of the solid body.

SOLUTION: An object to be machined is irradiated with high intensive super short pulse laser beams, a special change of an equal phase surface of the object to be machined is generated by the Kerr effect, whereby a self-convergence of the high intensive super short pulse laser beams is generated. And an operation break down is generated by the high intensive super short pulse laser beams which are self covered by the Kerr effect and plasma is generated in the object to be machined, whereby the high intensive super short pulse laser beams are self diverged. The self-convergence of the high intensive super short pulse laser beams is compensated by the self-divergence, and the self-divergence and the self-convergence of the high intensive super short pulse laser beams are balanced by controlling the irradiating intensity of the high intensive super short pulse laser beams onto the object to be machined, whereby linear machine is executed toward the direction wherein the high intensive super short pulse laser beams propagate through the object to be machined.



(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-207479

(43) 公開日 平成11年(1999)8月3日

(51) Int.Cl.⁶
B 23 K 26/00

H 01 S 3/00

識別記号

F I
B 23 K 26/00
H 01 S 3/00D
N
B

審査請求 未請求 請求項の数4 FD (全7頁)

(21) 出願番号 特願平10-23880

(22) 出願日 平成10年(1998)1月21日

(71) 出願人 000006792
理化学研究所
埼玉県和光市広沢2番1号

(72) 発明者 熊谷 寛
埼玉県和光市広沢2番1号 理化学研究所
内

(72) 発明者 緑川 克美
埼玉県和光市広沢2番1号 理化学研究所
内

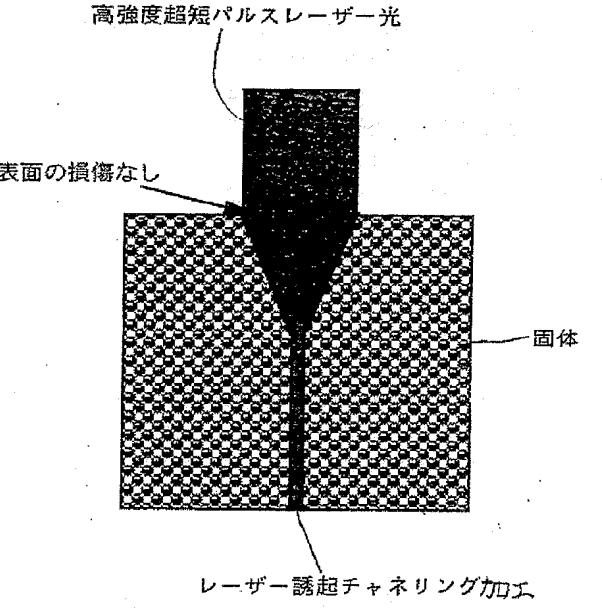
(74) 代理人 弁理士 上島 淳一

(54) 【発明の名称】 高強度超短パルスレーザー加工方法およびその装置

(57) 【要約】

【課題】 固体表面に損傷を与えることなく、固体内部のみを加工あるいは改質する。

【解決手段】 高強度超短パルスレーザー光を加工対象物に入力し、カーフェクトによって加工対象物の等位相面の空間的変化を起こして、高強度超短パルスレーザー光の自己収束を起こすとともに、カーフェクトにより自己収束された高強度超短パルスレーザー光により光学的ブレークダウンを起こして、加工対象物中にプラズマ発生させることにより高強度超短パルスレーザー光を自己発散させ、高強度超短パルスレーザー光の加工対象物への入力強度を制御することにより、高強度超短パルスレーザー光の自己発散により自己収束を打ち消して、高強度超短パルスレーザー光の自己発散と自己収束とをバランスさせて、高強度超短パルスレーザー光が加工対象物を伝搬する方向に向かって線状の加工を行う。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 高強度超短パルスレーザー光を加工対象物に入力し、カーポロ効果によって前記加工対象物の等位相面の空間的変化を起こして、高強度超短パルスレーザー光の自己収束を起こすとともに、前記カーポロ効果により前記自己収束された高強度超短パルスレーザー光により光学的ブレークダウンを起こして、前記加工対象物中にプラズマ発生させることにより高強度超短パルスレーザー光を自己発散させ、

前記高強度超短パルスレーザー光の前記加工対象物への入力強度を制御することにより、前記高強度超短パルスレーザー光の前記自己発散により前記自己収束を打ち消して、前記高強度超短パルスレーザー光の前記自己発散と前記自己収束とをバランスさせて、前記高強度超短パルスレーザー光が前記加工対象物を伝搬する方向に向かって線状の加工を行うことを特徴とする高強度超短パルスレーザー加工方法。

【請求項2】 請求項1に記載の高強度超短パルスレーザー加工方法において、

前記高強度超短パルスレーザー光は高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー光であることを特徴とする高強度超短パルスレーザー加工方法。

【請求項3】 高強度超短パルスレーザー光を生成する高強度超短パルスレーザーと、

前記高強度超短パルスレーザーにより生成された高強度超短パルスレーザー光を加工対象物に入力する際の入力強度を制御する入力強度制御手段とを有し、前記入力強度制御手段によって、前記高強度超短パルスレーザーにより生成された高強度超短パルスレーザー光を加工対象物に入力する際の入力強度を制御して、前記高強度超短パルスレーザー光が前記加工対象物を伝搬する方向に向かって線状の加工を行うことを特徴とする高強度超短パルスレーザー加工装置。

【請求項4】 請求項3記載の高強度超短パルスレーザー加工装置において、

前記高強度超短パルスレーザーは高強度フェムト秒チタンサファイアレーザーであることを特徴とする高強度超短パルスレーザー加工装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、高強度超短パルスレーザー加工方法およびその装置に関し、さらに詳細には、高強度超短パルスレーザーを用いて固体内部を加工する高強度超短パルスレーザー加工方法およびその装置に関する。

【0002】

【従来の技術】 従来より、固体を加工する方法としては、レーザープレーショーン、レーザーエッティング、レーザードーピングあるいはレーザーディポジションなどのレーザープロセシングによるレーザー加工方法や、電

子ビームエッティングなどの電子を利用したプロセンシングによる電子ビーム加工方法などが知られているが、こうした従来の加工方法は、いずれも光や電子を固体表面へ供給することにより、固体表面から構造変化や組成変化を引き起こさせる加工方法であり、固体表面に損傷を与えるをえなかった。

【0003】 また、イオン注入などのイオンプロセシングによるイオン加工方法も知られているが、このイオン加工方法においても、固体表面からイオンを注入することにより、固体表面から構造変化や組成変化を引き起こさせる加工方法であり、固体表面を無損傷のまま維持できるものではなかった。

【0004】 即ち、上記したような従来の加工方法においては、光、電子、イオンあるいはX線などにより、図1に示すように固体表面から構造変化や組成変化を引き起こせることになるので、固体表面に損傷を与えて、固体内部のみを加工あるいは改質することができないという問題点があった。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】 本発明は、従来の技術の有する上記したような問題点に鑑みてなされたものであり、その目的とするところは、固体表面に損傷を与えない、固体内部のみを加工あるいは改質することができるようとした高強度超短パルスレーザー加工方法およびその装置を提供しようとするものである。

【0006】

【課題を解決するための手段】 上記目的を達成するため、本発明は、以下のような手法に基づいてなされたものである。

【0007】 即ち、図2に示すように、高強度超短パルスレーザー光が固体内部を伝搬するときには、カーポロ効果（Kerr effect）によって、高強度超短パルスレーザー光の空間的強度分布を反映する屈折率変化による等位相面の空間的変化が起こり、等位相面に垂直な方向が光路になるので、屈折率変化が0より大きい場合には高強度超短パルスレーザー光の自己収束が起こることが知られている。

【0008】 そして、カーポロ効果により自己収束された高強度超短パルスレーザー光は、自己位相変調を起こすばかりでなく、自らの高光電界によって光学的なブレークダウンを起こして固体中にプラズマ発生させることにより自己発散する。

【0009】 本発明は、こうした高強度超短パルスレーザー光の自己発散により自己収束を打ち消して両者をバランスさせることにより、高強度超短パルスレーザー光が固体内部を伝搬する方向に向かって線状の加工（以下、この「線状の加工」を「チャネリング加工」と称する。）が行われるようとしたものである（図3参照）。こうしたチャネリング加工は、従来からの加工方法により行われていた表面からの加工と全く異なり、固体表面

に損傷を与えない。

【0010】なお、上記した本発明による高強度超短パルスレーザー光の照射により誘起されたチャネリング加工を、本明細書においては、「レーザー誘起チャネリング加工」と称することとする。

【0011】上記したように、本発明によれば、レーザー誘起チャネリング加工が行われるので、固体内部の加工分野および改質分野、半導体やマイクロマシン技術などに必要な3次元微細加工および改質分野、あるいは、ファイバー、レンズやミラー基板などのオプティックス内部の加工分野および改質分野に利用することができる。

【0012】また、レーザー誘起チャネリング加工された部分の屈折率は高くなっているので、光ファイバーのコア内にレーザー誘起チャネリング加工を行った場合には、コアのなかにコアを作る、即ち、屈折率変化の誘起によるコアの作製が可能となり、しかも單一モードファイバーのコア径と同程度の大きさのコアを作製できることから、マルチコアや任意形状のコアを作製することができ、偏波面の保存、偏光子、光学的なバンド・ギャップあるいはフィルタなどをファイバー内に作製することができる。

【0013】そして、本発明のうち請求項1に記載の発明は、高強度超短パルスレーザー光を加工対象物に入力し、カーフェラムによって上記加工対象物の等位相面の空間的变化を起こして、高強度超短パルスレーザー光の自己収束を起こすとともに、上記カーフェラムにより上記自己収束された高強度超短パルスレーザー光により光学的ブレーカダウンを起こして、上記加工対象物中にプラズマ発生させることにより高強度超短パルスレーザー光を自己発散させ、上記高強度超短パルスレーザー光の上記加工対象物への入力強度を制御することにより、上記高強度超短パルスレーザー光の上記自己発散により上記自己収束を打ち消して、上記高強度超短パルスレーザー光の上記自己発散と上記自己収束とをバランスさせて、上記高強度超短パルスレーザー光が上記加工対象物を伝搬する方向に向かって線状の加工を行うようにしたものである。

【0014】また、本発明のうち請求項2に記載の発明は、本発明のうち請求項1に記載の発明において、上記高強度超短パルスレーザー光を高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー光としたものである。

【0015】また、本発明のうち請求項3に記載の発明は、高強度超短パルスレーザー光を生成する高強度超短パルスレーザーと、上記高強度超短パルスレーザーにより生成された高強度超短パルスレーザー光を加工対象物に入力する際の入力強度を制御する入力強度制御手段とを有し、上記入力強度制御手段によって、上記高強度超短パルスレーザーにより生成された高強度超短パルスレーザー光を加工対象物に入力する際の入力強度を制御し

て、上記高強度超短パルスレーザー光が上記加工対象物を伝搬する方向に向かって線状の加工を行うものである。

【0016】また、本発明のうち請求項4に記載の発明は、本発明のうち請求項2に記載の発明において、上記高強度超短パルスレーザーを高強度フェムト秒チタンサファイアレーザーとしたものである。

【0017】

【発明の実施の形態】以下、添付の図面に基づいて、本発明による高強度超短パルスレーザー加工方法およびその装置の実施の形態の一例を詳細に説明するものとする。

【0018】図4には、本発明による高強度超短パルスレーザー加工装置の実施の形態の一例の概念構成図が示されており、この高強度超短パルスレーザー加工装置は、高強度超短パルスレーザー光として、波長が780 nmであり、パルス幅が110フェムト秒であり、最大出力エネルギーが1mJ/pulse(パルス)であり、繰り返し周波数が1kHzである高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー(Ti:Sapphires laser)10と、高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー10の入力強度を制御する入力強度制御装置12と、高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー光の不要な成分を除去するフィルター14と、高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー光を集光レンズ16と、加工対象物18とを有して構成されている。なお、集光レンズ16による高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー光の集光点Fは、加工対象物18の高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー光の入力側の端面より手前側に位置するように設定されている。

【0019】さらに、本実施の形態においては、高強度超短パルスレーザー加工装置は、加工対象物18の状態を観察するための光学顕微鏡20と、光学顕微鏡20を制御するための光学顕微鏡制御装置22と、レンズ24と、半透過ミラー26と、フィルター28と、スペクトラムアナライザ30と、入力強度を検出するパワーメーター32とを有している。

【0020】次に、加工対象物18として、バルク形状の物質ではなくて、レーザー誘起チャネリング加工の進展の径方向からの観察に有利なマルチモード光ファイバー(具体的には、コア/クラッドの直径が100μm/110μmのマルチモードシリカファイバーを使用した。)を使用し、入力強度制御装置12により高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー10を制御することによって、入力強度が10¹¹W/cm²以上の高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー光を加工対象物18(マルチモード光ファイバー)に通し、加工対象物18(マルチモード光ファイバー)中でレーザー誘起チャネリング加工を行った場合の実験結果について説明する。

【0021】即ち、入力強度制御装置12により高強度

フェムト秒チタンサファイアレーザー10を制御して、高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー光の入力強度を様々に変化させて加工対象物18（マルチモード光ファイバー）に入射した状態を光学顕微鏡20で観察した。なお、入力強度は、パワーメーター32により検出した。

【0022】そうすると、入力強度が $8 \times 10^{11} \text{ W}/\text{cm}^2$ を越えるまでは、加工対象物18（マルチモード光ファイバー）には何の変化も起きないが（図5（a）参照）、入力強度が $8 \times 10^{11} \text{ W}/\text{cm}^2$ を越えると、加工対象物18（マルチモード光ファイバー）の軸に沿つていくつかの小さなプラズマが形成されるのが観察された（図5（b））。これにより、加工対象物18（マルチモード光ファイバー）中のプラズマ形成の入力強度のしきい値は、 $8 \times 10^{11} \text{ W}/\text{cm}^2$ であることがわかる。

【0023】そして、入力強度を $8 \times 10^{11} \text{ W}/\text{cm}^2$ を越えて徐々に大きくしていくと、加工対象物18（マルチモード光ファイバー）の軸に沿ったプラズマの形成領域も拡大していく（図5（c）参照）、入力強度が $1.5 \times 10^{12} \text{ W}/\text{cm}^2$ を越えると、加工対象物18（マルチモード光ファイバー）の入力端から9mm～10mmの長さにわたってレーザー誘起チャネリング加工が行われた（図5（d）参照）。

【0024】次に、加工対象物18として、固体内部の改質の進展が容易に観察できるコア／クラッドの直径が異なる2種類のマルチモード光ファイバー（ステップインデックス）を使用し、加工対象物18（マルチモード光ファイバー）中のレーザー誘起チャネリング加工による改質を観察した場合の実験結果について説明する。具体的には、入力強度制御装置12により高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー10を制御して、入力強度を $1.7 \times 10^{12} \text{ W}/\text{cm}^2$ に設定した高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー光をコア／クラッドの直径が $100 \mu\text{m}/110 \mu\text{m}$ と $200 \mu\text{m}/220 \mu\text{m}$ との2種類の加工対象物18（マルチモード光ファイバー）に5分間照射した。

【0025】まず、コア／クラッドの直径が $100 \mu\text{m}/110 \mu\text{m}$ の加工対象物18（マルチモード光ファイバー）においては、レーザー誘起チャネリング加工による改質の領域は、直径 $5 \mu\text{m}$ で長さ約6mmになることが観察された（図6（a）参照）。

【0026】なお、入力強度が約 $1.7 \times 10^{12} \text{ W}/\text{cm}^2$ のとき、透過パワーは約3分間（ 1.8×10^5 ショット）の間でおよそ $6 \times 10^{11} \text{ W}/\text{cm}^2$ まで減少する。伝搬する高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー光は改質が起こった範囲で一部反射や散乱され、これらの現象によって透過パワーの減少がおこる。

【0027】さらに、 $100 \mu\text{m}/110 \mu\text{m}$ のコア／クラッドの直径をもつ加工対象物18（マルチモード光

ファイバー）の導波路構造の効果を調べるために、上記したように、加工対象物18として $200 \mu\text{m}/220 \mu\text{m}$ のコア／クラッドの直径をもつマルチモード光ファイバーを使用して実験した。

【0028】この場合に、図6（a）に示す実験の場合と同一の照射条件下において、レーザー誘起チャネリング加工による改質の領域は、直径 $5 \mu\text{m}$ になることが観察された（図6（b）参照）。

【0029】従って、 $200 \mu\text{m}/220 \mu\text{m}$ のコア／クラッドの直径をもつマルチモード光ファイバーの改質の領域は、 $100 \mu\text{m}/110 \mu\text{m}$ のコア／クラッドの直径をもつマルチモード光ファイバーの改質の領域と同様の直径であることがわかり、買い戻された部分の直径はマルチモード光ファイバーの直径に依存しないことがわかる。

【0030】なお、出願人の実験によれば、レーザー誘起チャネリング加工により、コア径 $100 \mu\text{m}$ のマルチモード光ファイバー中に直径 $5 \mu\text{m}$ 、長さ10mm（アスペクト比 >2000 ）の改質を起こすこともできたものであり、こうした改質された領域の屈折率は高くなっている。

【0031】従って、光ファイバーのコア内にレーザー誘起チャネリング加工を行った場合には、コアのなかにコアを作る、それも単一モードファイバーのコア径と同程度の大きさのコアを作製できるため、マルチコアや任意形状のコアを作製することができ、偏波面の保存、偏光子、光学的なバンド・ギャップあるいはフィルタなどをファイバー内に作製することができる。

【0032】【発明の効果】本発明は、以上説明したように構成されているので、固体表面に全く損傷を与えずに、固体内部のみを加工あるいは改質することができるという優れた効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【図1】従来の加工方法を示す概念説明図である。

【図2】カーブ効果の概念説明図である。

【図3】本発明によるレーザー誘起チャネリング加工の手法を示す概念説明図である。

【図4】本発明による高強度超短パルスレーザー加工装置の実施の形態の一例の概念構成図である。

【図5】入力強度を変化させた場合におけるレーザー誘起チャネリング加工が行われる状態を示す光学顕微鏡写真であり、（a）は入力強度が $3 \times 10^{11} \text{ W}/\text{cm}^2$ であるときを示し、（b）は入力強度が $8 \times 10^{11} \text{ W}/\text{cm}^2$ であるときを示し、（c）は入力強度が $1 \times 10^{12} \text{ W}/\text{cm}^2$ であるときを示し、（d）は入力強度が $1.5 \times 10^{12} \text{ W}/\text{cm}^2$ であるときを示す。

【図6】コア／クラッドの直径を変化させた場合におけるレーザー誘起チャネリング加工により改質された領域を示す光学顕微鏡写真であり、（a）はコア／クラッド

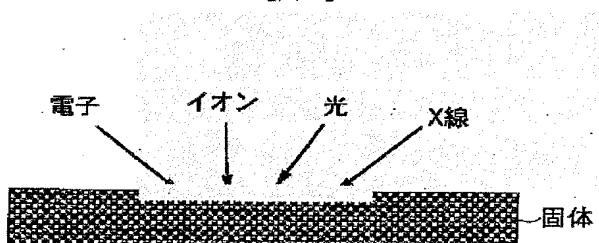
の直径が $100\mu m$ / $110\mu m$ の場合を示し、(b)はコア/クラッドの直径が $200\mu m$ / $220\mu m$ の場合を示す。

【符号の説明】

| | |
|----|----------------------|
| 10 | 高強度フェムト秒チタンサファイアレーザー |
| 12 | 入力強度制御装置 |
| 14 | フィルター |
| 16 | 集光レンズ |

| | |
|----|-------------|
| 18 | 加工対象物 |
| 20 | 光学顕微鏡 |
| 22 | 光学顕微鏡制御装置 |
| 24 | レンズ |
| 26 | 半透過ミラー |
| 28 | フィルター |
| 30 | スペクトラムアナライザ |
| 32 | パワーメーター |

【図1】



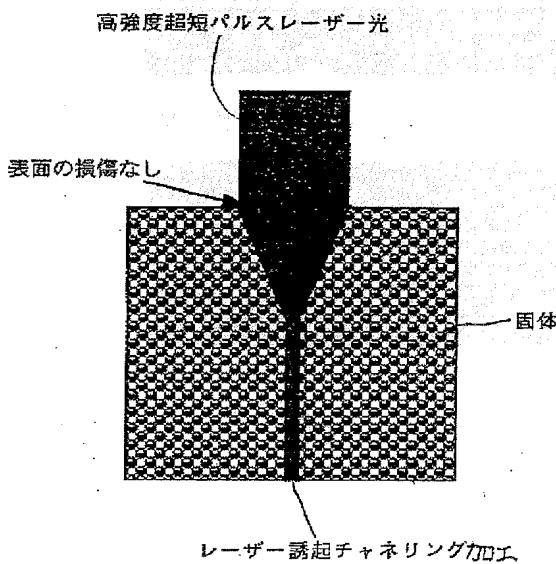
【図2】

チャネリングにおける自己収束効果のメカニズム

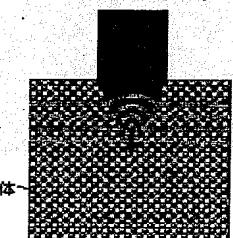
Kerr効果

非線形屈折率を持つ媒質中を光が伝搬するとき、その空間的強度分布に著しい変化が起きる。

【図3】



高強度超短パルスレーザー光



等位相面に垂直な方向が光路になるから、 $\Delta n > 0$ の場合収束することになる。

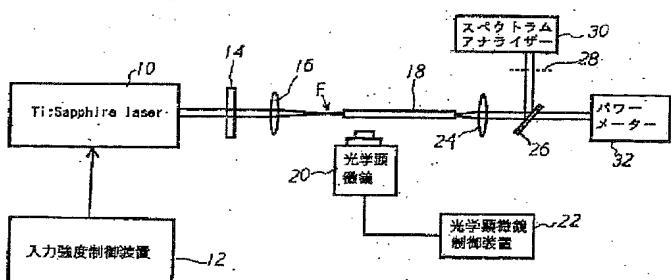
最小ビーム径

$$d_{min} = \frac{1.22 \lambda}{\sqrt{8n_0 \delta n}}$$

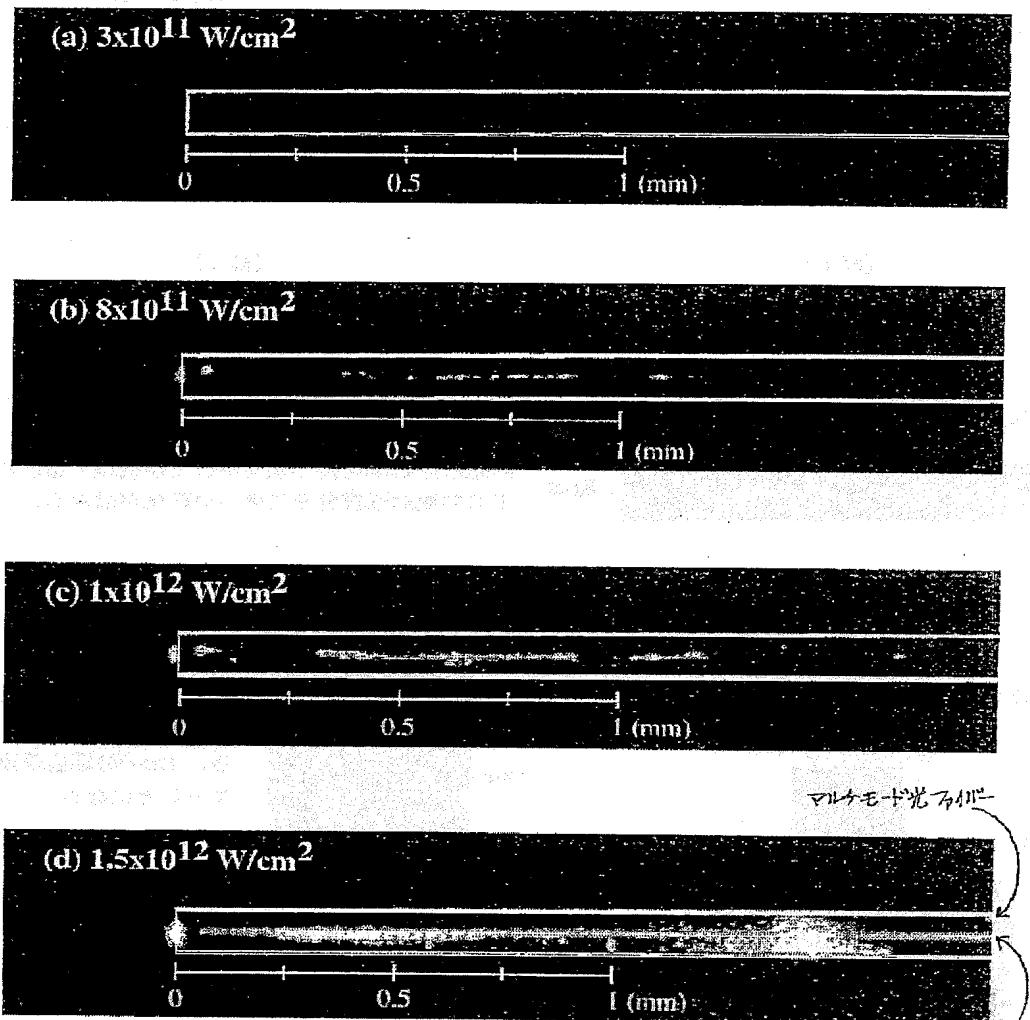
$$n = n_0 + \Delta n = n_0 + n_2 I$$

石英ガラス : $\Delta n = 2.54 \times 10^{-4}$ ($I = 8 \times 10^{11} W/cm^2$)
 $d_{min} = 18 \mu m$

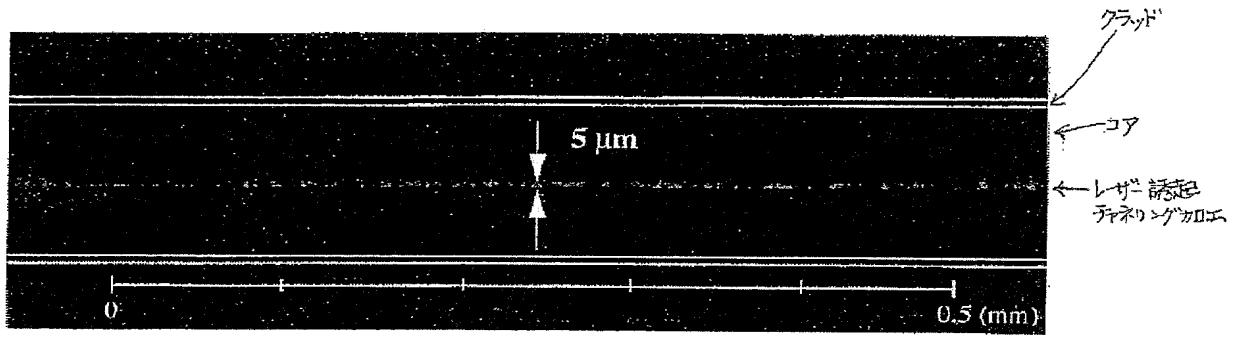
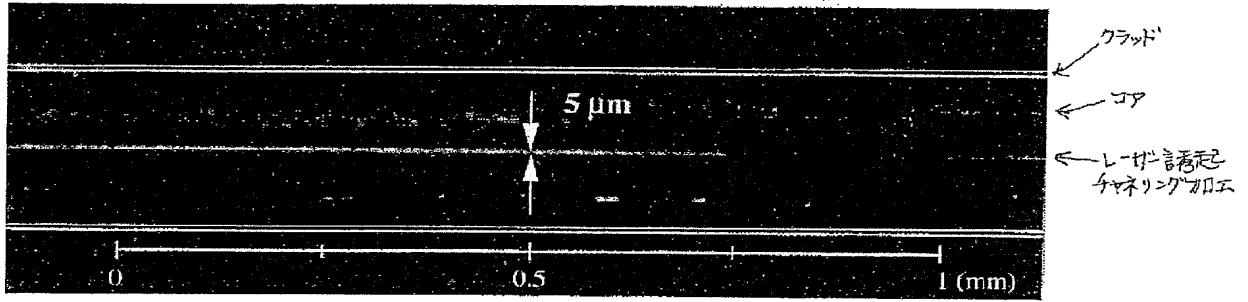
【図4】



【図5】



【図6】

(a) 100/110 μm core/cladding diameter(b) 200/220 μm core/cladding diameter